

Экспериментальные образцы имели структуру металл – полимер – металл. В ходе изготовления образцов были использованы два метода отжига полимерных пленок: в присутствии атмосферы и в вакууме. Методом исследования в данной работе являлся вольт-амперные характеристики. Анализ полученных результатов был проведен в рамках модели инжекционных токов, ограниченных объемным зарядом. Это позволило оценить подвижности и концентрации носителей заряда.

В результате проведенных исследований установлено, что наличие кислорода при формировании пленки приводит к более высокой проводимости (Рис. 1.). Полученные результаты объясняются повышением подвижностей носителей заряда плёнок, изготовленные при присутствии кислорода. В докладе обсуждаются возможные применения данного явления на практике.

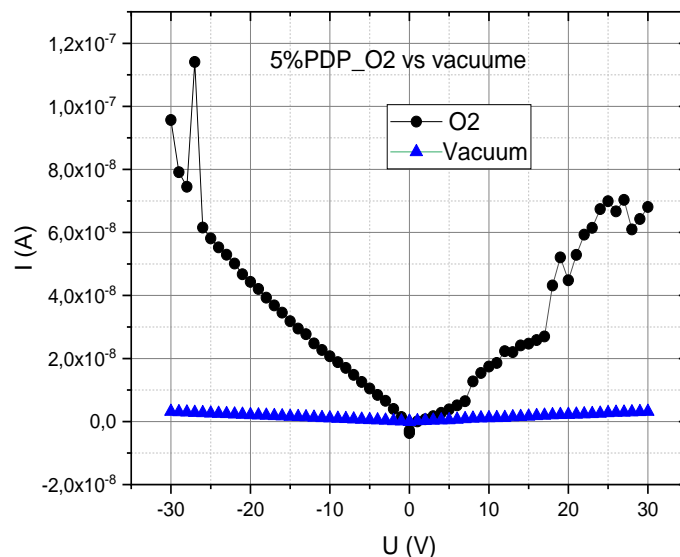


рис. 1. Вольт-амперные характеристики тонких полимерных плёнок, изготовленные на воздухе и в вакууме; пленка изготовлена из 5% раствора полидифениленфталид

Список публикаций:

[1] А.Р. Юсупов, А.Н. Лачинов, Л.Р. Калимуллина, Р.М. Гадиев, Д.В. Никитина //Физика твердого тела, 2019, том 61, вып. 3, С.581-586.

Синтез InGaAlAs/InP из трехкомпонентных твердых растворов

Колосовский Данил Антонович

Дмитриев Дмитрий Владимирович, Торопов Александр Иванович, Гуляев Дмитрий Владимирович,
Гаврилова Татьяна Александровна, Кожухов Антон Сергеевич

Новосибирский национальный исследовательский государственный университет

Институт физики полупроводников им. А. В. Ржанова СО РАН

Журавлев Константин Сергеевич, д.ф.-м.н.

danil-ak@yandex.ru

Гетероэпитаксиальные структуры (ГЭС) InGaAlAs синтезируемые методом молекулярно-лучевой эпитаксии (МЛЭ) на подложке (001)InP нашли применение в большом количестве приборов радиотоники: фотодетекторы [1], лазеры [2-5] и электро-оптические модуляторы (ЭОМ) [6]. Достоинством слоев InGaAlAs является то, что варьируя между собой состав In, Ga и Al можно получить узкозонный материал [6], широкозонный материал [5], и материал с различными коэффициентами преломления [6]. Однако, несмотря на все плюсы данного материала, синтез эпитаксиальных слоев InGaAlAs изучен не до конца. В работах [7-9] твердый раствор InGaAlAs синтезировали на подложке InP различными эпитаксиальными методами. Авторы данных работ приводят спектры фотолюминесценции (ФЛ), кривые качания высокоразрешающей рентгеновской дифрактометрии и данные о концентрации и подвижности носителей заряда, но в то же время авторы не упоминают морфологию поверхности, кристаллическую структуру, наличие прорастающих дислокаций или дефектов, а также резкость гетерограниц. Таким образом, целью работы является исследование структурных характеристики слоев InGaAlAs выращенных методом МЛЭ.

Существует две основные технологии роста четырехкомпонентного твердого раствора InGaAlAs: классическая МЛЭ и цифровая МЛЭ. В классическом методе МЛЭ рост эпитаксиальных слоев происходит за счет атомарных или молекулярных потоков, которые поступают на поверхность подложки из молекулярных источников. Таким образом, для синтеза слоев InGaAlAs в классической МЛЭ на поверхность подложки InP поступают потоки In, Ga, Al и As. В методе цифровой МЛЭ рост слоев InGaAlAs происходит за счет попеременного роста моноатомных слоев InAlAs/InGaAs. В данной работе использовался метод цифровой МЛЭ т.к. этот метод обладает хорошей воспроизводимостью задаваемых составов, за счет неизменности потоков материалов из источников, т.к. для получения различных составов меняется время открытия заслонки источника, а не его температура.

Рост эпитаксиальных слоев InGaAlAs проводился в ростовой камере МЛЭ установки Riber Compact-21T на полуизолирующих *epi-ready* подложках (001)InP фирмы AXT. МЛЭ установка оснащена системой дифракции быстрых электронов на отражение (ДБЭО) с системой регистрации дифракционных картин kSA 400 фирмы k-Space Associates, что обеспечило возможность изучения атомных процессов на поверхности подложки и эпитаксиальной пленки в процессе роста. Контроль молекулярных потоков, поступающих на поверхность подложки, осуществлялся двумя независимыми способами: (1) С помощью ионизационной лампы «Bayard-Alpert JBA» и вакуумметра «Granville-Phillips series 350». Для измерения эффективного давления в потоке лампа помещалась в положение под подложкой, где параметры эффективного давления в потоке считывались с ионизационной лампы вакуумметром. Учитывая коэффициент ионизации, для каждого элемента вычислялись потоки материалов поступающие на поверхность ГЭС. После измерения лампа убирается в сторону, в специальную полость ростовой камеры. (2) Измерение скорости роста по осцилляциям интенсивности зеркального рефлекса в ДБЭО. Каждый полный период в осцилляциях соответствует росту одного монослоя. Получив экспериментальные данные на тестовом образце, по скорости роста каждого компонента задавался состав и толщины для синтезируемых слоев и структур. Температура подложки контролировалась *in-situ* инфракрасным пирометром «IIcon Modline Plus».

Слои $\text{In}_x\text{Ga}_y\text{Al}_{1-x-y}\text{As}$ толщиной от 0.2 мкм до 1 мкм синтезировались методом цифровой МЛЭ путем совмещения роста отдельных моноатомных слоев $\text{In}_{0.52}\text{Al}_{0.48}\text{As}$ и $\text{In}_{0.53}\text{Ga}_{0.47}\text{As}$ решеточно-согласованных с подложкой (001)InP. Состав $x = 0,5275$, $y = 0,3525$ набирался из 6 монослоев InGaAs и 2 монослоев InAlAs. А состав $x = 0,5283$, $y = 0,3917$ набирался 10 монослоев InGaAs и 2 монослоев InAlAs. Твердый раствор InGaAlAs синтезировался при температурах 480-505°C, так как оптимальная ростовая температура InGaAs составляет 480°C [10], а для InAlAs 500-510°C [11]. Для исследования структурных характеристик выращенных слоев InGaAlAs использовались такие методы как: метод оптической дефектоскопии поверхности, метод просвечивающей электронной микроскопии (ПЭМ), метод ФЛ и методом атомно-силовой микроскопии. Спектр ФЛ слоя $\text{In}_{0.52}\text{Ga}_{0.39}\text{Al}_{0.09}\text{As}$ содержит единственный пик на 0.89 эВ, что совпадает с данными работы [9], в которой синтез слоев InGaAlAs проводился классическим МЛЭ методом, и с данными работы [10], где синтез слоев InGaAlAs осуществлялся методом цифровой МЛЭ. Методом оптической дефектоскопии поверхности установлено, что более чем на 90% поверхности плотность дефектов не превышает значения 1000 см^{-2} . Метод АСМ показал явно выраженные моноатомные ступени на поверхности ГЭС, что характеризует двумерно-слоевой рост. Так же методом АСМ установлено, что среднеквадратичная шероховатость поверхности не превышает 0,7 нм, что соответствует 2-3 монослоям. На ПЭМ изображениях поперечного скола видны четкие гетерограницы, отсутствие прорастающих дислокаций и дефектов.

Таким образом, в работе экспериментально изучен процесс роста методом цифровой МЛЭ четверного твердого раствора InGaAlAs, синтезируемого путем совмещения роста отдельных моноатомных слоев InAlAs и InGaAs, и исследованы структурные характеристики выращенных слоев.

Используя разработанную технологию эпитаксиального роста, были получены ГЭС InGaAlAs/InAlAs/InP, на которых были изготовлены макеты ИОМ Маха–Цендера. В активной области ГЭС значение показателя преломления изменяется на 2×10^{-3} при напряжении 1В [6].

Список публикаций:

- [1] Jelen C., et. al., // *IEEE Journal of Quantum Electronics*. 1998. V. 34. P. 1873-1876.
- [2] G. K. Kuang, et. al., // *Journal of Crystal Growth*. 2001. V. 227-228. P. 334-337.
- [3] M. Belz, et. al., // *Electronics Letters*. 1991. V. 27. P. 93-95.
- [4] F. Steinhagen, et. al., // *Electronics Letters*. 1995. V. 31. P. 274-275.
- [5] F. Steinhagen, et.al., // *Proceedings of 8th International Conference on Indium Phosphide and Related Materials*. 1996. P. 777-780.
- [6] D. V. Gulyaev, et. al., // *ITM Web of Conferences*. 2019. V. 30. P. 1-7.
- [7] K. Masu, et. al., // *Journal of Applied Physics*. 1982. V. 53. P. 7558-7560.
- [8] Yi Gu, et. al., // *Journal of Infrared and Millimeter*. 2012. V. 31. P. 358-389.
- [9] T. Fujii, et. al., // *Japanese Journal of Applied Physics*. 1986. V. 25. P. 254-256.
- [10] D. V. Dmitriev, et. al., // *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 2019. V. 475. P. 012022.
- [11] Д. А. Колосовский, Д. В. Дмитриев. // *Физика твердого тела материалы 57-й Международной научной студенческой конференции*. 2019. С. 17.